

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Konstrukce robotické ruky se čtyřmi prsty

Design of a Four-Finger Robotic Hand

Student: Jakub Melčák

Vedoucí bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:	Jakub Melčák
Studijní program:	B2341 Strojírenství
Studijní obor:	2301R013 Robotika
Téma:	Konstrukce robotické ruky se čtyřmi prsty Design of a Four-Finger Robotic Hand

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte konstrukční řešení čtyřprsté robotické ruky s článkovými prsty vyrobenými technologií Rapid Prototyping s ovládáním pohybu pomocí lankových převodů a modelářských servomotorů.
2. Navrhněte varianty řešení čtyřprsté robotické ruky s článkovými prsty z hlediska kinematické struktury, vnitřních lankových rozvodů a vhodných pohonů.
3. Vybrané koncepční řešení rozpracujte do úrovně detailního 3D modelu a podkladů pro výrobu.
4. Práci doplňte podrobnou technickou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynů vedoucího).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Lung-Wen Tsai *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. New York : John Wiley & Sons, 1999. 520 pp. ISBN 0-471-32593-7
2. Skařupa, J. – Mostýn, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.
3. Skařupa, J. – Mostýn, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2002. 190 s. ISBN 80-88922-55-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr.Ing. Vladimír Mostýn**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

prof. Dr.Ing. Petr Novák
vedoucí katedry

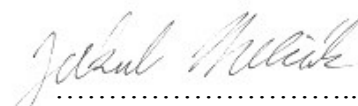


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2013


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было сједнано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было сједнано, že užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2013



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jakub Melčák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dělnická 19
792 01 Bruntál

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MELČÁK J. *Konstrukce robotické ruky se čtyřmi prsty: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2013, 52 s. Vedoucí práce: Mostýn, V.

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí čtyřprsté robotické ruky. V úvodu jsou uvedeny současné víceprsté antropomorfní robotické ruce. Dále jsou zde rozpracovány varianty řešení, využívající různých kinematických řešení. Na základě hodnotové analýzy je vybrána optimální varianta, která je dále detailně rozpracována. Je zde řešeno jednak konstrukční řešení, dále dimenzování a výběr vhodných pohonů a nakonec je řešeno řízení. Po všech výpočtech a detailním propracováním 3D modelu jsou jednotlivé komponenty vytištěny pomocí Rapid Prototypingu a dále jsou zakoupeny všechny mechanické komponenty a spojovací materiál. Po sestavení a uvedení do chodu slouží robotická ruka jako ukázkový a výukový model na Katedře robototechniky Vysoké školy báňské, Technické univerzity v Ostravě.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MELČÁK, J. *Design of a Four-Finger Robotic Hand: Bachelor Thesis*. Ostrava. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2013, 52 p. Supervisor: Mostýn, V.

This bachelor thesis deals with desing of fouf-finger robotic hand. In the introduction, the current multi-finger anthropomorphic robotic hand are mentioned. There are developed variations of solution, using different kinematic solution. Based on value analysis is selected optimal variant, which is further elaborated in detail. There is solving the structural solutions, sizing and selection of suitable actuators and finally solved the control. After all calculations and detailed elaboration of 3D model components are printed using Rapid Prototyping and are purchased all mechanical components and fasteners. After assembly and putting into operation of the robotic hand is used as a demonstration and education model at the Department of Robotics VSB, Technical University of Ostrava.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práci prof. Dr. Ing. Vladimíru Mostýnovi za rady, podněty a připomínky v průběhu zpracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavovi Krysovi, Ph.D. za rady ohledně výroby součástí pomocí technologie Rapid Prototyping a za následnou výrobu všech komponent, které byly potřeba pro sestavení robotické ruky.

Obsah

Seznam použitého označení, zkratk a termínů	9
0 Úvodní slovo	10
1 Rešerše stávající robotické ruce s více prsty	11
1.1 Hlavní úloha robotické ruky	11
1.2 Konstrukce	13
1.3 Současné víceprsté robotické ruce	14
1.3.1 Sandia	14
1.3.2 MAC-HAND	15
1.3.3 Shadow Hand	16
1.3.4 BeBionic	17
1.3.5 Handroid	18
1.3.6 Elu-2 Hand	18
2 Požadavkový list	19
3 Návrh variant řešení	20
3.1 Přenos síly pomocí kladek a lanek	20
3.2 Lanka v bovdenu a použití pružin	22
3.3 Použití lanek vedených kladkami v kombinaci s pružinami	23
3.4 Pevné kladky a lanka ve smyčce	24
4 Hodnotová analýza	25
5 Rozpracování vybrané varianty	31
5.1 Kinematika pohybu prstu a konstrukční řešení	31
5.1.1 Rozmístění kladek a lanek	31
5.1.2 Výpočet průměru kladek	33
5.1.3 Spojení prstů pomocí čepů a jejich pevnostní kontrola	34
5.1.4 Rozmístění prstů a pevnostní výpočty článků prstů	35
5.2 Dimenzování a výběr vhodných servomotorů	36
5.3 Řízení pohybu prstů	40
5.4 Konstrukční řešení zápěstí	43
5.5 Pevnostní kontrola zápěstí	45

6	Analýza možných úchopů.....	47
7	Cenová kalkulace	49
8	Závěrečné zhodnocení	50
9	Seznam použité literatury	51
10	Seznam příloh	52

Seznam použitého označení, zkratek a termínů

Název	Označení	Jednotka
a	zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
A	proud	[A]
g	tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
F	síla	[N]
m	hmotnost	[kg]
M	krouticí moment	$[N \cdot mm]$
R	poloměr	[mm]
S	délka	[mm]
U	napětí	[V]
$\hat{\varphi}$	úhel opásání	[rad]
φ	úhel opásání	[°]

Zkratka

Význam

DOF	(Degree Of Freedom) počet stupňů volnosti
HS – 58 BB	Označení servomotorů
HS – 225 BB	
MKP	Metoda konečných prvků
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
OM	Objekt manipulace
RR	Robotická ruka
SMA	(Shape Memory Alloys) slitiny s tvarovou pamětí
USB	(Universal Serial Bus) univerzální sériová sběrnice

Termín

Význam

antropomorfní	Napodobující schematicky tvary lidské postavy
biomechanika	Nauka o struktuře a mechanickém chování živých organismů
efektor	Úchopná hlavice robota
protetický	náhradní, umělý

0 Úvodní slovo

Robotika se začala rozvíjet jako samostatný obor už zhruba před osmdesáti lety. Cílem člověka bylo vždy to, aby si co nejvíce ulehčil práci. Ve výrobě bylo cílem vždy minimalizovat čas výroby a tím tedy vyprodukovat více výrobků. A právě díky tomuto záměru začaly vznikat první roboty a většina z nich se kvůli tomuto účelu vyrábí i dodnes. Mimo jiné se robotika začala uplatňovat také ve sféře zdravotnictví. Objevovali se zprvu dřevěné protetické náhrady končetin, které postupně začaly být mechanizovány až do podoby dnešních sofistikovaných protetických náhrad z lehkých a odolných materiálů, které mají velké množství taktilních sensorů pro bezpečné uchopování předmětů a také veliký rozsah pohybů, který u nejnovějších prototypů předčí možnosti končetiny zdravého člověka.

Tato bakalářská práce je zaměřena na vývoj čtyřprsté robotické ruky. Součástí řešení této bakalářské práce je navržení variant a následné vybrání optimální varianty. U této optimální varianty bude řešena kinematika pohybu prstů, následně bude navrženo vhodné konstrukční řešení a v poslední fázi bude provedeno dimenzování motorů s následným výběrem vhodných motorů a elektroniky pro řízení. Řešení by mělo být jednoduché z důvodu dodržení finančního limitu, ale zároveň musí splňovat všechny zadané podmínky. Po dokončení návrhu budou jednotlivé části vyrobeny pomocí technologie Rapid Prototyping, dále bude nakoupen všechn spojovací materiál a elektronika a robotická ruka bude sestavena jako funkční prototyp.

1 Rešerše stávající robotické ruce s více prsty

1.1 Hlavní úloha robotické ruky

V úvodu této bakalářské práce bude nejprve vysvětleno pár technických pojmů, které se zde budou vyskytovat. Všeobecně roboti používají pro manipulaci s objekty koncový člen, který je nazýván efektor, chapadlo, nebo úchopná hlavice. Úkolem v této práci bude sestavit takové chapadlo, které se bude co nejvíce podobat ruce lidské. Pro takovýto typ chapadla se v robotice ujalo několik pojmů a různí autoři používají různá označení takovýchto víceprstých chapadel. Pojem, který se zde bude nejčastěji vyskytovat je antropomorfní chapadlo. Pochází z řečtiny a skládá se ze dvou slov, antropos – člověk a morpos – tvar. Jiní autoři používají názvy jako například androidní hlavice nebo biomechanické ruce. Ani ve světové literatuře není sjednocený název pro označení víceprstého chapadla a proto se nemusím striktně držet jednoho názvu. To je vše k rozboru názvu a nyní je možno přejít k samotnému rozboru dané problematiky. [1]

Hlavním cílem vývoje robotických antropomorfních rukou je sestavení takové robotické ruky, která bude jednoduchá, ale přitom vysoce účinná a dále by tato ruka měla být co nejlevnější. To umožní nasazení takovéto RR v průmyslovém výrobním systému. Uchopování předmětu rozličných tvarů je velice složité, a proto jsou současné RR navrhovány pro uchopování předem definovaných tvarů objektu. Pouze lidská ruka je schopna uchopovat objekty jakéhokoliv tvaru a proto se při návrhu vychází právě z ruky lidské, protože zatím nebyla zkonstruována žádná RR, která by byla dokonalejší než právě ruka lidská. Vycházíme tedy ze čtyř prstů, proti kterým je postavený palec. Lidská ruka se dokáže pohybovat v trojdimenzionálním prostoru a je schopna dosáhnout jakéhokoliv bodu v tomto prostoru. V praxi se nacházejí nejrůznější druhy konstrukcí a počet prstů vždy závisí na dané aplikaci. [11]

V dnešní době mají RR významné zastoupení ve výrobním systému, jedná se především o manipulaci s předměty během a po obrábění, řezání, vrtání anebo broušení. Automatizace výrobního procesu musí zajistit manipulaci s předmětem, kterou zajišťuje právě RR. Každý efektor je navržen pro uchopení specifického tvaru daného objektu, zatímco RR je schopna uchopit objekt jakéhokoliv tvaru velice efektivně a pevně. [11]

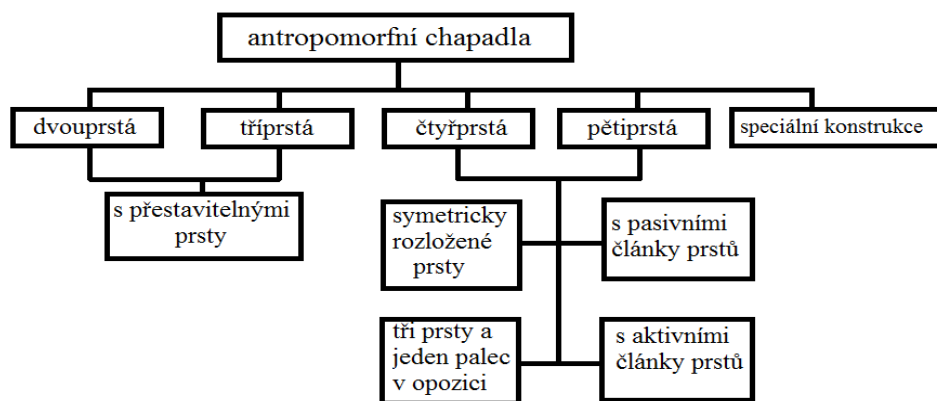


Obr. 1.1 – protetická náhrada horní končetiny

Co se týče využití RR v nestrojírenských oborech, tak nacházejí uplatnění mimo jiné i u neobvyklých aplikací jako je například manipulace pod vodou, nebo v kosmickém prostoru. Dále je můžeme najít u různých typů mobilních robotů s manipulační nástavbou, dvounohých kráčejících robotů anebo jako náhrady amputovaných horních končetin (obr. 1.1). [11]

Důležité vlastnosti antropomorfního chapadla:

- Dokáže uchopit předměty všech možných tvarů
- Uzvedne těžší objekty: RR je schopno uzvednout šest až sedmkrát těžší předměty než efektor, který žádné prsty nemá
- Je možno uchopit objekt kdekoli v třídimenčním prostoru
- Jsou požadovány nižší výkony motorů
- Je levnější a má nižší váhu: RR se skládá z minimálního počtu motorů a materiály, použité na výrobu jsou lehké a pevné
- Může být přeprogramováno velice jednoduše pro různé situace
- Dobrá stabilita a koordinace [11]



Tab. 1.1 – Základní rozdělení antropomorfních chapadel

1.2 Konstrukce

Na začátku se první antropomorfní chapadla využívala jako protetická zařízení (protézy). Později se uplatnily v technické praxi, kde měla za úkol uchopování předmětů obecného tvaru. Hlavním cílem vývoje bylo především to, vytvořit co nejpresnější kopii ruky člověka. V praxi však není nezbytné, aby mělo chapadlo všech pět prstů a postupně se tedy objevovaly modely s méně než pěti prsty. V zásadě lze říci, že pro stabilní uchopení předmětu je potřeba třech nejméně tří prstů. Další prsty se poté přidávají pro ještě přesnější uchopení předmětu manipulace anebo pro zvýšení tlaku, kterým je předmět uchopován. K uvedení do pohybu se užívají různé druhy pohonu a podle toho se tedy rozděluje na antropomorfní chapadla:



Obr. 1.2 – ruka s tzv. umělými svaly

- s elektropohony
- s pneumatickými pohony
- s umělými svaly (obr. 1.2) [3]

Co se týče pohonů, tak se dříve používaly především elektromotory nebo pneumatické pohony. V dnešní době se však využívá tzv. umělých svalů. Jedná se o svaly, které představují pružiny z materiálu s tvarovou pamětí. Tyto materiály nesou označení SMA, které vychází z anglického Shape Memory Alloys. Tyto materiály jsou schopny měnit svůj tvar v závislosti na teplotě. Když tedy budeme tento materiál zahřívat, popřípadě ochlazovat, tak se bude měnit jeho tvar a tím bude konat mechanickou práci. [4]



Obr. – 1.3 – modelářský servomotor

V tomto případě budou použity k pohonu 4 modelářské servomotory (obr. 1.3). Tyto motory fungují jako klasické servomotory s tím rozdílem, že jsou rozměrově menší a dosahují tím pádem i menších krouticích momentů. Používají se především v modelech aut, letadel nebo lodí. Dále jsou kompaktní a jsou tím pádem vhodné pro moji aplikaci. Jejich výkon bude stačit pro dosažení běžné uchopovací síly, jaké je možné

dosáhnout průměrný člověk. Každý prst bude tedy pohánět jeden servomotor, který bude umístěn v předloktí a sílu do prstů bude přenášet pomocí ocelového/silonového lanka. K pohybu kladek nebudou použity ložiska, protože by poté celá konstrukce byla zbytečně těžká a pro tento případ, kdy se kladka nebude otáčet kolem celé své osy a ani příliš často bude dostačující pouze styková vazba. Každý prst bude mít 3 články, tedy stejně, jako má lidská ruka.

1.3 Současné víceprsté robotické ruce

1.3.1 Sandia

Tato robotická ruka byla vyvinuta v laboratoři Sandia v Novém Mexiku. Jedná se o čtyřprstou ruku, která je určena především k použití v pyrotechnice. Má dvanáct stupňů volnosti a vyznačuje vysokou přesností a šikovností. Výhoda této ruky je ta, že jednotlivé prsty jsou opatřeny magnety, které jsou odnímatelné. Když tedy ruka přijde o nějaký svůj

VŠB – TU Ostrava, 2013

prst, může ho hned nahradit druhým, což je při zneškodňování bomb výhodná vlastnost. Hravě si poradí s uchopováním předmětů, které při své práci potřebuje jako je například šroubovák, svítidla nebo dokonce i kleště. [5]

Některé nástroje jdou také nasadit místo prstů. Konečky prstů jsou pokryty vrstvou krystalizovaného gelu, který se svými vlastnostmi velice podobá lidské tkáni a dává tedy ruce další výhodu v podobě bezpečnější manipulace s předměty. Jediná nevýhoda této ruky je zatím její cena, pohybuje se okolo 250 tisíc dolarů (cca 5 milionů Kč). Masivní rozšíření tedy čekat nemůžeme. Vědci tvrdí, že cena by se mohla snížit na 10 tisíc dolarů, což je asi 200 tisíc Kč. [5]



Obr. 1.4 – Robotická ruka Sandia

1.3.2 MAC-HAND

Jedná se také o čtyřprstou ruku, která byla vyvinuta vědci na Univerzitě v Ženevě v Itálii. Každý prst má tři stupně volnosti a je poháněn čtyřmi nezávislými lankami, které jsou poháněny stejnosměrnými motory. Kontrola se provádí čtyřmi mikroprocesory, tedy pro každý prst jeden mikroprocesor. Všechny čtyři prsty jsou identické a skládají se ze dvou částí. [6]



Obr. 1.5 – Ruka MAC-HAND

Každý prst je poháněn nezávisle čtyřmi motory a každý motor je řízen samostatným mikrokontrolérem. Poloha každého motoru je sledována pomocí potenciometru. Váha této ruky se pohybuje okolo 350 g, to ovšem bez motorů a kabeláže. S motory a všemi kabely může vážit ruka až jeden kilogram. Nízká váha skeletonu je zaručena díky tomu, že články jsou vyrobeny z polymerů, které se vyznačují nízkou hmotností a relativně vysokou pevností. [6]

počet prstů	4 (identické)
DOF	12 (3 pro každý prst)
senzory síl	8 (2 pro každý prst)
dotykové senzory	8 (2 pro každý prst)
pohony	16(16V,DC)
váha	350g (bez pohonů)
délka prstů	115 mm
šířka prstů	23 mm
délka celé ruky	180 mm
maximální zatížení	2,5 N (na špičku prstu)

Tab. 1.2 – Technické specifikace

1.3.3 Shadow Hand

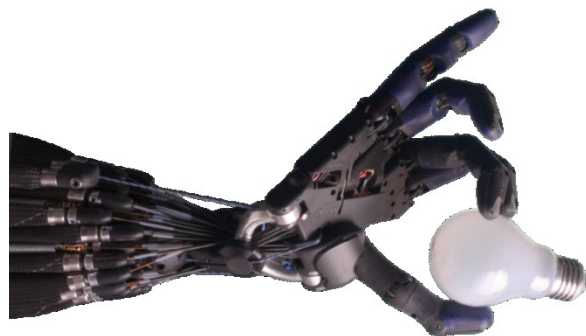


Obr. 1.6 – Shadow motor hand

Tato robotická ruka má celkem 5 prstů a místo jejího zrození je ve společnosti The Shadow Robot Company v Londýně. Ruka má srovnatelné vlastnosti s rukou lidskou, co se týče velikosti i tvaru. Má dokonce i stejný počet stupňů volnosti jako ruka lidská. Tato ruka je již komerčně dostupná a nyní se používá především v NASA. Dále se vyznačuje také tím, že je poháněna pneumaticky. V předloktí je umístěno 40 tzv. pneumatických svalů. Tyto svaly jsou poddajné a jsou v nich senzory, což umožňuje uchopení křehkých předmětů jako je například sklo. O

ovládání těchto svalů se stará celkem 80 ventilů, které jsou umístěny také v předloktí. Cena této robotické ruky se pohybuje okolo 100 000 dolarů. [7]

Firma Sdadow Robor Company nabízí tuto ruku ještě v druhé verzi, která nese název Shadow motor Hand. Jak již vyplývá z názvu, tato ruka je poháněna pomocí motorů. Tyto motory nesou název "Smart Motor", což v češtině znamená chytrý motor. Tyto motory spojují do jednoho celku jednak samostatný motor, elektroniku, převodovku, dále snímače a řídicí jednotku. U této ruky je umožněna přesná manipulace řízená vzdáleným počítačem anebo může být napojena na stávající platformu robota. Může být také vybavena velkým počtem senzorů, což zvýší integrace s okolím. [7]



Obr. 1.7 – Shadow hand

1.3.4 BeBionic

BeBionic je název protetické ruky, se kterou přišli výzkumníci z Velké Británie. Nejedná se tedy o ruku, která by byla využitelná v průmyslu, ale jde o ruku, která má pomoci lidem s tělesným postižením. Je v prodeji již od června 2010 a poprvé byla představena na světovém kongresu ISPO v Lipsku. Tato sofistikovaná končetina je bezdrátově naprogramována, přičemž každý uživatel má jiné naprogramování. Tajemství tkví v převedení svalových kontrakcí, jež zaznamená senzor, který je převede na elektrický

impulz a ruka se následně uvede do pohybu. Další převratná novinka je v tom, že na ruce je umístěno čtyřicet citlivých senzorů, které se aktivují tlakem. Elektrický impulz je veden zpátky do paže uživatele a informuje jeho mozek o tom, že něco drží ve své ruce. Tato inovace přinesla svým uživatelům tu výhodu, že když berou do ruky například vajíčko, tak cítí, jakým tlakem ho mačkají, a tudíž už se nestane to, že by vajíčko rozmáčkli, jako se to stávalo u starších typů protéz. [8]



Obr. 1.8 – BeBionic

1.3.5 Handroid

S touto pětiprstou rukou přichází na trh Japonská společnost ITK. Při vývoji se japonští inženýři zaměřili na snížení hmotnosti na minimum. A to se jim také povedlo. Tato ruka totiž váží pouhých 740 gramů. Další výhodou by má být cena, která by se podle odhadů měla během následujících dvou let dostat pod hranici sto tisíc korun. Nízké hmotnosti se podařilo dosáhnout tím, že servo motory, které se běžně umísťují do každého kloubu, byly umístěny do zápěstí a stačilo tedy použít jeden servo motor na každý prst, který se ohýbá pomocí lanka. To však s sebou přináší tu nevýhodu, že každý prst pouze jeden stupeň volnosti a tudíž nenabízí plnou škálu pohybů.

Ruka je ovládána pomocí speciální rukavice, ve které jsou umístěny senzory snímající pohyb ruky člověka, který jí má navlečenou na své ruce. Pohyb je zpracován a odeslán ruce robotické, která vykonává identický pohyb. Japonští výzkumní pracovníci pracují na vylepšení ruky do podoby protetické ruky, které by snímala elektrické signály přímo z ruky uživatele. Cena této ruky by však byla několikanásobně vyšší než cena ruky stávající. [9]



Obr 1.9 – Handroid

1.3.6 Elu-2 Hand

Tato robotická ruka je již druhá v pořadí a navazuje na ruku Elu-1 Hand. Vývoj této ruky spadá pod společný projekt Elumotions, který se zabývá vývojem a realizací mimo jiné i robotických paží ale i celých robotů. Vývojáři se v tom to projektu, stejně jako já, zaměřili na co největší napodobení lidské ruky. A to jednak co se týče rozměrů ale také celkového rozsahu pohybů. Je také určena pro interakci s rukou lidskou, tedy například

podání ruky. Dále má za úkol uchopovat co největší množství nejrozličnějších nástrojů a objektů. Ruku lze připojit na celou robotickou paži od téže společnosti s názvem Elu2-Arm. [10]



Obr. 1.10 – Elu-2 Hand

Co se týče technických parametrů, tak tato ruka má celkem 9 stupňů volnosti, které jsou realizovány servomotory. Materiál, z něhož je ruka vyrobená, je kombinovaný. Z části jde kov a z části o plast. Kov je zde použit jako nosný prvek a má zaručovat tuhost a pevnost ruky. Tento kov je obalen plastovými prvky tak, aby dotvořil tvar skutečné ruky. Plast je použit za účelem snížení hmotnosti celé ruky. Polštářky prstů

jsou dále pokryty speciálním měkkým materiálem, který zvyšuje uchopovací schopnost ruky a zabraňuje poškození uchopovaných předmětů. Dále jsou prsty vybaveny dotykovými sensory. Proto není pro tuto ruku problém například uchopení skleničky tak, aby se nerozbila, ale zároveň aby mohla být sklenička naplněna tekutinou a aby ji ruka neupustila. [10]

2 Požadavkový list

Nosnost	Max. 1 kg
Pohon	4 modelářské servomotory
Přenos síly	ocelové/silonové lanko
Počet stupňů volnosti	4
Technologie výroby RR	Rapid prototyping
Materiál	Polykarbonát (PC)
Cena	max. 20 000 Kč

3 Návrh variant řešení

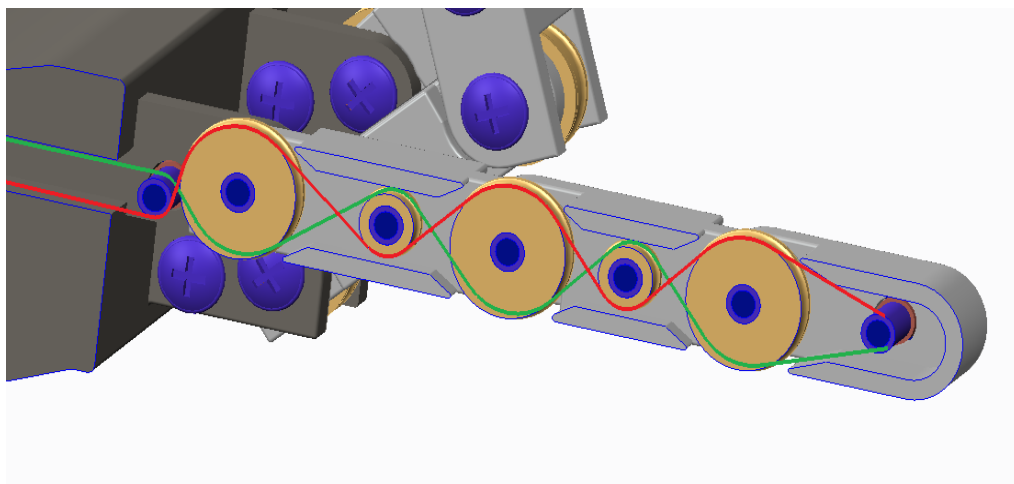
Dnes se používají při přenosu síly pomocí lanek 2 způsoby. Jeden tzv. open loop chain(otevřený řetězec) a closed loop chain(uzavřený řetězec). První uvedený tzv. otevřený řetězec je založen takovém principu, že jedna část lanka je uchycena na pohonu a druhá část je vedena až k poháněnému ústrojí, kde je nějakým způsobem uchycena. Druhý způsob tzv. uzavřený řetězec je založen na principu smyčky. Lanko je omotáno na jedné straně na pohonu a na druhé straně na poháněném ústrojí. Úskalí tohoto způsobu přenosu síly se skýtá v tom, aby bylo zajištěno tření mezi kladkami a lankem a aby nedocházelo k prokluzování. Při návrhu variant řešení bude kladen důraz na to, aby byly použity oba způsoby přenosu síly. [2]

Výše uvedená rešerše ukazuje, jak propracované řešení robotických rukou mohou být. Všechny ruce mají vysoký počet stupňů volnosti a množství senzorů. Mé řešení je omezeno počtem motorů, které mohu použít. Jelikož jsou k dispozici pouze 4 motory, tak mé řešení může mít pouze 4 stupně volnosti. V robotické ruce také nebudou implementovány žádné sensory, jelikož by se zvýšila jednak složitost řízení ale také celková cena. Hlavním úkolem při řešení variant tedy bude navrhnout způsob pohybu jednotlivých prstů. Jelikož na jeden prst lze použít pouze jeden motor, tak bude mít každý prst pouze jeden stupeň volnosti a pohyby jednotlivých článků budou svázány a úkolem tedy bude návrh jednotlivých pohyby tak, aby výsledná ruka byla s to uchopit co nejvíce předmětů rozličných tvarů.

3.1 Přenos síly pomocí kladek a lanek

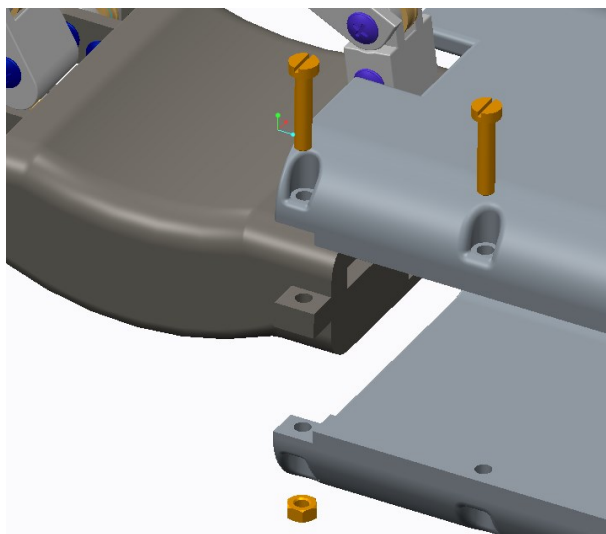
U první varianty jsou použity pro přenos síly pomocí lanek kladky, které jsou umístěny mezi jednotlivými články prstů. Jedná se o otevřený typ řetězce. Každý prst se stává ze čtyř článků, přičemž palec je postaven do opozice proti zbývajícím třem článkům. V zápěstí jsou díry, kterými bude provlečeno lanko, které dále povede do předloktí k pohonům. Pro spojení jednotlivých článků jsou použity šrouby s vnitřním závitem, které budou současně zastávat úlohu čepu. Palec v opozici má navíc ještě jednu kladku, která bude sloužit pro správné nasměrování lanka. Jedná se o otevřený typ řetězce.

Každý článek prstů má rozsah pohybu vůči ose otáčení 90° , tedy stejně jako u ruky lidské. Při návrhu rozměrů částí ruky je vycházeno z rozměrů lidské ruky v toho důvodu, aby byl model co nejvěrohodnější. Výjimkou je však umístění palce. Je umístěno doprostřed zápěstí do opozice ostatních prstů z důvodu jednoduššího uchopování předmětů, ale také se tím značně zjednoduší konstrukce. Mezi válcovou plochou šroubu s vnitřním závitem a kladkou je kluzné tření. Použití valivého tření v podobě kuličkových ložisek zde není vhodné. Jako jeden z důvodů je to, že se kladka bude rotovat pouze o výše zmíněných 90° a pohyb také nebude častý. Nevýhodou požití kuličkových ložisek by také byla jejich hmotnost, která by nám příliš zatížila prst, který je jinak vyroben z plastu.



Obr. 3.1 – první varianta – řez

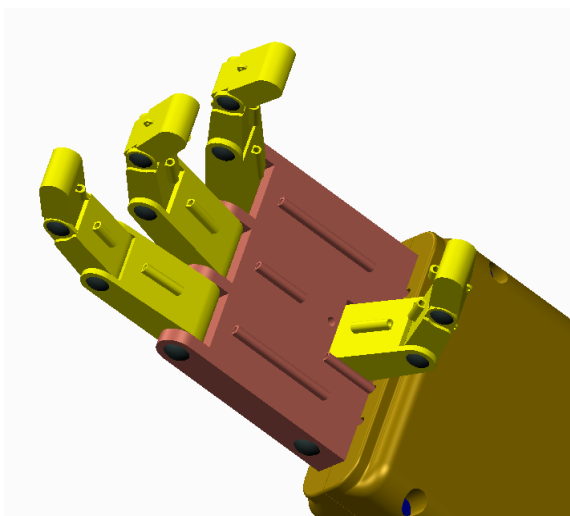
Na obrázku 3.1 lze vidět řez prstem. Je zde použit systém kladky s velkým průměrem, která je umístěna v kloubu prstů a kladky menšího průměru, která je vždy umístěna uprostřed článku prstu. Při zatažení červeného lanka dojde k postupnému svírání všech článků prstu. Pro vrácení polohy prstu do původní polohy bude stačit zatažení lanka zeleného. Všechny osm lanek bude vedeno do předloktí, kde je budou pohánět 4 servomotory. Na servomotor bude umístěna kladka a na ní se bude namotávat ocelové lanko. Toto zajistí plynulý pohyb lanka. Jelikož je v této variantě lanek 8 a serva pouze 4, využijeme té vlastnosti serva, že se může otáčet na obě strany. Na jedné straně klady bude proto lanko pro svírání prstů a na druhé straně lanko na natahování prstů.



Obr. 3.2 – Uchycení zápěstí k ruce

Na obrázku 3.2 je vidět detailní pohled na způsob uchycení předloktí k samotné ruce. Předloktí sestává ze dvou částí, které jsou symetrické a které jsou k sobě přichyceny šesti šrouby. Samotné předloktí bude k ruce přichyceno pomocí tvarového spojení s rukou, které bude zajištěno dvěma šrouby.

3.2 Lanka v bovdenu a použití pružin

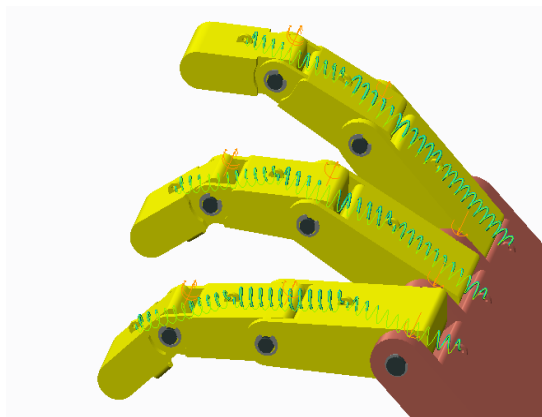


Obr. 3.3 – druhá varianta

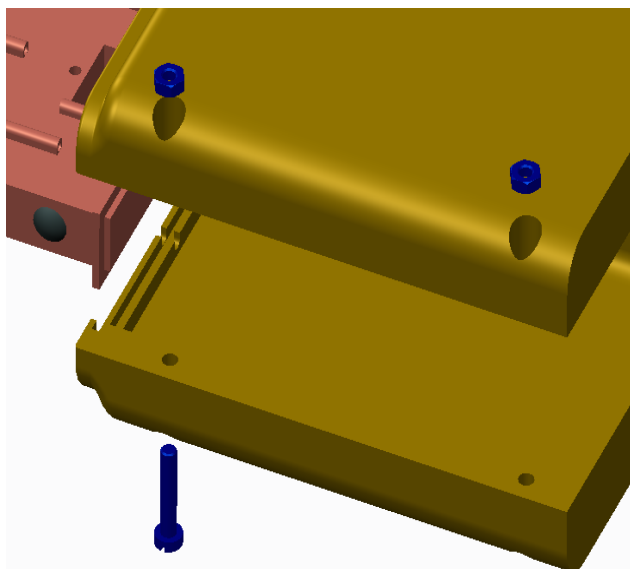
Druhá varianta využívá podobné konstrukce jaký výše zmíněná první varianta. Jedná se také o otevřený typ řetězce. Prsty mají taktéž tři články a palec je postaven v opozici. Lanko zde však není vedeno skrz prsty, ale je navlečeno v bovdenu, který je umístěn na vnitřních stranách prstů. Tato lanka budou sloužit pro stisk ruky, pro uvolnění budou použity pružiny, jak můžete vidět na obrázku 3.4.

Zápěstí je v tomto případě tenčí, než v prvním případě a to díky tomu, že lanka jsou vedena na povrchu zápěstí. To sice povede k úspoře materiálu, ale esteticky lepší vzezření nám dá model, u kterého budou vedeny lanka uvnitř a na venek půjde co nejméně poznat jak je ruka poháněna. Jelikož je ale zápěstí tenčí, tak bylo potřeba pro uchycení jednotlivých článků prstů jeden veliký šroub, který nám připojí k zápěstí celkem 3 prsty.

Jsou zde použity pružiny, jelikož jde o levnou a poměrně jednoduchou součást, kterou lze na prst rychle namontovat a není zde potřeba řešit další vedení lanek. Nevýhodou pružiny však je to, že se časem vytáhá a nebude již schopna vrátit prst do původní polohy jako na začátku montáže pružiny. Jediné řešení je náhrada staré pružiny za novou. Jednotlivé prsty budou spojeny čepy, které zajistí jejich vzájemný pohyb, vůči ose čepu.



Obr. 3.4 – umístění pružiny

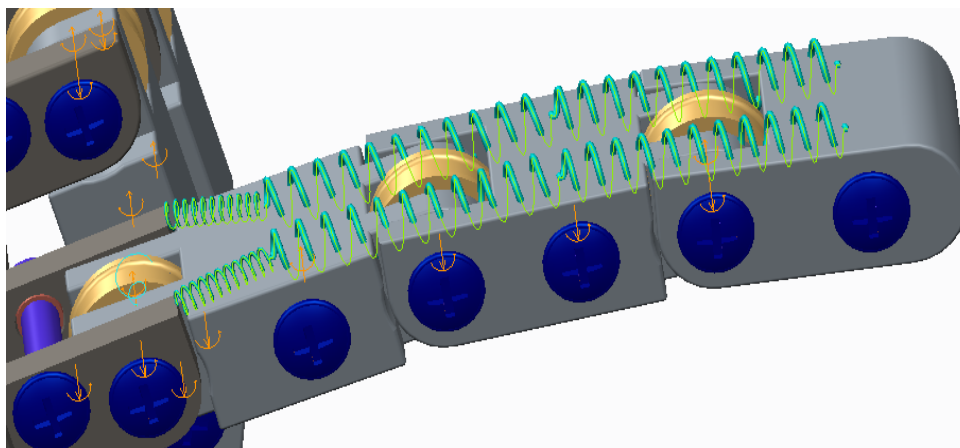


Obr. 3.5 – Uchycení předloktí k zápěstí

Pohon bude opět veden do předloktí, kde budou čtyři servomotory, které budou zajišťovat natahování ocelových lanek. Na každém servomotoru bude kladka, ke které bude připevněno ocelové lanko. To zajistí plynulý pohyb lanka a tím i plynulý pohyb jednotlivých prstů. Předloktí sestává ze dvou částí, které jsou navzájem spojeny čtyřmi šrouby. Předloktí je dále spojeno se samotnou rukou jednoduchým tvarovým stykem. (obr. 3.5)

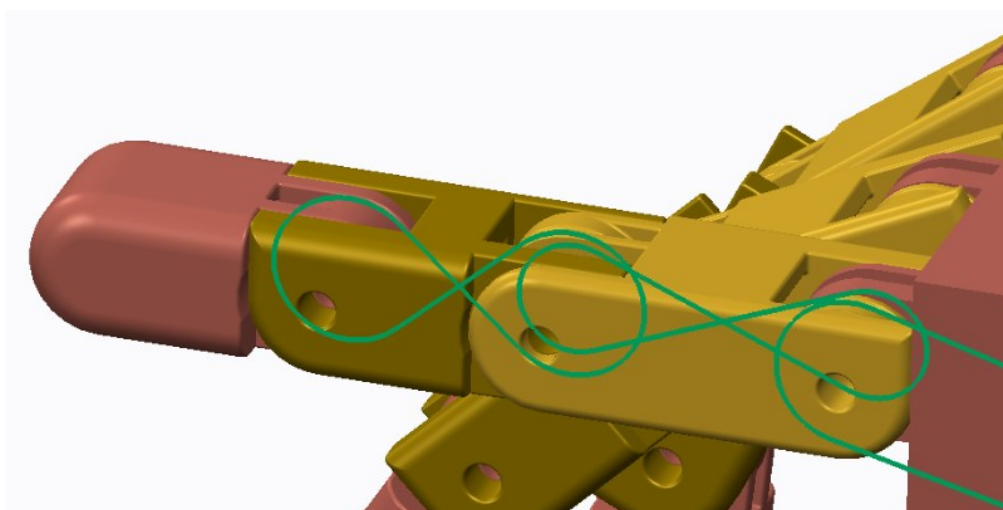
3.3 Použití lanek vedených kladkami v kombinaci s pružinami

V poslední variantě je využito kombinace dvou předchozích variant. Jedná se tedy také o otevřený typ řetězce. Pro svírání prstů bude sloužit lanko, které bude vedeno přes kladky jako u první varianty. Pro návrat prstů do původní polohy však nebudu používat druhého lanka, avšak využiji pružin na vnější straně prstů, jako u varianty druhé. Na spojení dvou prstů jsou použity ale pružiny dvě, jelikož je v kloubu kladka, po které se posouvá lanko, kontakt pružiny s lankem na kladce by tedy mohl způsobit kolizi. Konstrukce prstů a předloktí zůstane identický s první variantou.

*Obr 3.6 – varianta 3*

3.4 Pevné kladky a lanka ve smyčce

V poslední variantě je použit uzavřený typ řetězce. Hlavním rozdílem od předchozích variant je to, že kladky jsou pevně spojeny se samotnými prsty. Kdyby totiž byly uloženy volně jako v předchozích variantách, kladky by se volně protáčely a nic by se nehýbalo, krom otáčejících se kladek. Ze servomotorů bude vedeno lanko na článek prstu, který je nejbližší zápěstí. To bude zajišťovat pohyb celého prstu. Je zde ale potřeba, aby se ohýbaly i další články prstů a to se zajistí dalšími smyčkami lanka. Lanko ale nemůže být připevněno k článku, který je před ním, ale až ke druhému článku, který je před ním.

*Obr. 3.7 – čtvrtá varianta*

Dále je nutno zajistit dostatečné tření mezi kladkami, aby nedocházelo k prokluzu. Toto jde zajistit několika způsoby. Buďto lze lanko omotat vícekrát kolem kladky, nebo lze umístit napínací kladku. To by však nebylo vhodné vzhledem k velikosti prstů a myslím, že by to bylo i těžko proveditelné. Třetí způsob je uchycení lanka ke kladce v části, kde se nebude odvalovat pomocí lepidla.

Významnou výhodou u této varianty hraje fakt, že pomocí různých průměrů kladek lze zajistit úhel, o který se jednotlivé články prstů budou ohýbat. U předchozích variant tento úhel nejde korigovat a mohlo by to způsobovat problémy.

U této poslední varianty jsou servomotory umístěny přímo do zápěstí, což vede ke zmenšení celkové délky ruky a tudíž i ke zmenšení objemu celkového materiálu a to v konečném důsledku vedle ke snížení nákladů.

4 Hodnotová analýza

Jednotlivé varianty budou nyní porovnány pomocí hodnotové analýzy. Tento krok umožní objektivně zhodnotit jednotlivé varianty robotické ruky. Na základě zvolených kritérií a jejich významnosti je možno určit variantu nejlépe vyhovující požadavkům, tedy optimální variantu.

Hodnoty kritérií	
6	Vysoká úroveň
5	Dobrá úroveň
4	Průměrná úroveň
3	Nízká úroveň
2	Nevyhovující úroveň
1	Nepříznivý stav

Tab. 4.1 – Hodnoty kritérií

Významnost kritérií	
2	Nejvyšší
1	Nejnižší

Tab. 4.2 – Významnost kritérií

Výběr vhodných kritérií

Označení kritéria	Název kritéria	Charakteristika kritéria
K1	Složitost montáže	Technická složitost pro smontování RR
K2	Konstrukce	Technická náročnost konstrukce
K3	Výrobní náklady	Náklady na materiál + montáž
K4	Obtížnost řízení	Složitost řízení pohybů ruky
K5	Údržba	Náročnost údržby
K6	Spolehlivost	Technická spolehlivost

*Tab. 4.3 – Výběr vhodných kritérií***Hodnocení kritérií**

Kritérium	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
K1	Střední složitost	Vyšší složitost	Střední složitost	Střední složitost
	5	3	5	5
K2	Nízká náročnost	Průměrná náročnost	Průměrná náročnost	Nízká náročnost
	5	3	3	5
K3	20 000,-	22 000,-	21 000,-	20 000,-
	5	3	4	5
K4	Těžší řízení	Střední obtížnost	Střední obtížnost	Lehké řízení
	2	3	3	5
K5	Minimální nároky	Základní údržba	Základní údržba	Minimální nároky
	5	4	4	5
K6	Průměrná spolehlivost	Vysoká spolehlivost	Vysoká spolehlivost	Lepší spolehlivost
	3	5	5	4

*Tab. 4.5 – Hodnocení kritérií***Stanovení významnosti kritérií**

V následující fázi dojde k porovnání jednotlivých kritérií. Experti budou postupně posuzovat významnost dvou vůči sobě postavených kritérií. Vítězné kritérium je vždy barevně odlišeno.

1. Expert – Jakub Melčák

Porovnávané páry kritérií					Počet voleb v	Pořadí
K1	K1	K1	K1	K1	1,5	5.
K2	K3	K4	K5	K6	-----	
	K2	K2	K2	K2	3	3. - 4.
	K3	K4	K5	K6	-----	
		K3	K3	K3	3	3. - 4.
		K4	K5	K6	-----	
			K4	K4	3,5	1. - 2.
			K5	K6	-----	
				K5	0,5	6.
				K6	3,5	1. - 2.

Tab. 4.6 – Porovnání prvního experta

2. Expert – Jan Mejzlík

Porovnávané páry kritérií					Počet voleb v	Pořadí
K1	K1	K1	K1	K1	2,5	4.
K2	K3	K4	K5	K6	-----	
	K2	K2	K2	K2	2	5.
	K3	K4	K5	K6	-----	
		K3	K3	K3	3	3.
		K4	K5	K6	-----	
			K4	K4	3,5	2.
			K5	K6	-----	
				K5	0	6.
				K6	4	1.

Tab. 4.7 – Porovnání druhého experta

3. Expert – Martin Ryšavý

Porovnávané páry kritérií					Počet voleb v	Pořadí
K1	K1	K1	K1	K1	3	2.
K2	K3	K4	K5	K6	-----	
	K2	K2	K2	K2	1,5	6.
	K3	K4	K5	K6	-----	
		K3	K3	K3	2	4. - 5.
		K4	K5	K6	-----	
			K4	K4	2,5	3.
			K5	K6	-----	
				K5	2	4. - 5.
				K6	4	1.

Tab. 4.8 – Porovnání třetího experta

Výpočet koeficientu významnosti

Nejprve se musí vypočítat průměrná hodnota počtu voleb podle hodnocení jednotlivých expertů. K tomuto je použit následující výpočet:

$$v_1 = \frac{v_{11} + v_{21} + v_{31}}{n} \quad [1]$$

$$v_1 = \frac{1,5 + 2,5 + 3}{3}$$

$$v_1 = 2,33$$

Následující hodnoty se vypočítají stejným způsobem

Legenda :

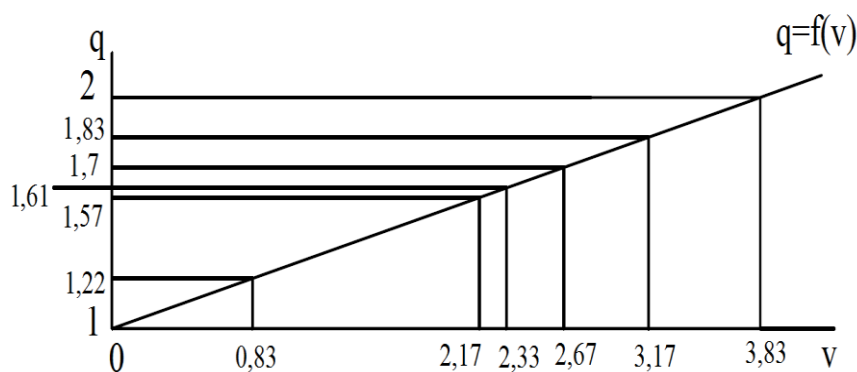
v_{11} ...počet voleb 1. experta u K1 v_{21} ...počet voleb 2. experta u K1

v_{31} ...počet voleb 3. experta u K1 n ...počet expertů

Kritérium	Počet voleb v
K1	2,33
K2	2,17
K3	2,67
K4	3,17
K5	0,83
K6	3,83

Tab. 4.9 – Počet voleb

Nyní se určí jednotlivé koeficienty významnosti. Ty se určí pomocí grafu



Obr. 4.1 – Graf pro určení koeficientu významnosti

Kritérium	Koeficient významnosti q_i
K1	1,61
K2	1,57
K3	1,7
K4	1,83
K5	1,22
K6	2

Tab. 4.10 – Koeficienty významnosti

Výpočet váženého indexu

Ukázka výpočtu váženého indexu:

$$I_{ij}' = I_{ij} \cdot q_i \quad [2]$$

$$I_{ij}' = 5 \cdot 1,61$$

$$I_{ij}' = 8,05$$

Legenda:

q_i – váha významnosti i-tého parametru

I_{ij} – index změny i-tého parametru j-té varianty

Varianta 1				
Kritérium	Hodnota	Váha významnosti kritéria q_i	Index změny I_{ij}	Vážený index kritéria I_{ij}'
K1	5	1,61	5	8,05
K2	5	1,57	5	7,85
K3	5	1,7	5	8,5
K4	2	1,83	2	3,66
K5	5	1,22	5	6,1
K6	3	2	3	6
Součet vážených indexů kritéria				40,16

Tab. 4.11 – Vážený index kritéria pro variantu 1

Varianta 2				
Kritérium	Hodnota	Váha významnosti kritéria q_i	Index změny I_{ij}	Vážený index kritéria I_{ij}'
K1	3	1,61	3	4,83
K2	3	1,57	3	4,71
K3	3	1,7	3	5,1
K4	5	1,83	5	9,15
K5	4	1,22	4	4,88
K6	5	2	5	10
Součet vážených indexů kritéria				38,67

Tab. 4.12 – Vážený index kritéria pro variantu 2

Varianta 3				
Kritérium	Hodnota	Váha významnosti kritéria q_i	Index změny I	Vážený index kritéria
K1	5	1,61	5	8,05
K2	3	1,57	3	4,71
K3	4	1,7	4	6,8
K4	3	1,83	3	5,49
K5	4	1,22	4	4,88
K6	5	2	5	10
Součet vážených indexů kritéria				39,93

Tab. 4.13 – Vážený index kritéria pro variantu 3

Varianta 4				
Kritérium	Hodnota	Váha významnosti kritéria q_i	Index změny I	Vážený index kritéria
K1	5	1,61	5	8,05
K2	5	1,57	5	7,85
K3	5	1,7	5	8,5
K4	5	1,83	5	9,15
K5	5	1,22	5	6,1
K6	4	2	4	8
Součet vážených indexů kritéria				47,65

Tab. 4.14 – Vážený index kritéria pro variantu 4

Určení vítězné varianty

Varianta	Celkový součet vážených indexů	Pořadí
K1	40,16	2.
K2	38,67	4.
K3	39,93	3.
K4	47,65	1.

Tab. 4.14 – Vítězná varianta

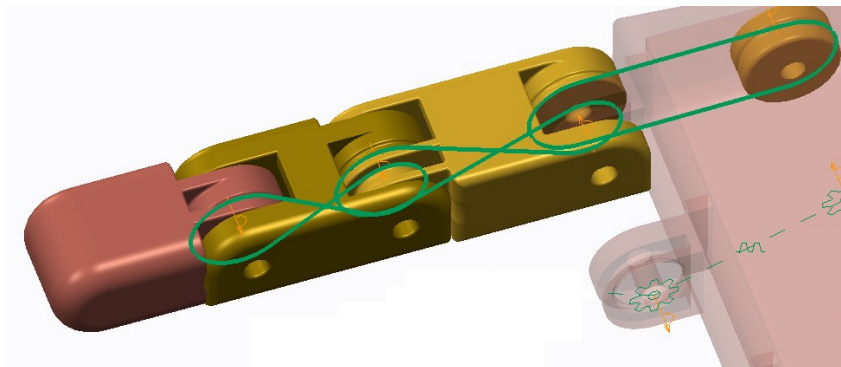
Po srovnání součtů jednotlivých vážených indexů vychází jako vítězná varianta 4. Tedy varianta, kde budu používat pro přenos síly uzavřený smyčky.

5 Rozpracování vybrané varianty**5.1 Kinematika pohybu prstu a konstrukční řešení***5.1.1 Rozmístění kladek a lanek*

Konstrukční řešení vybrané varianty využívá tzv. closed loop chain, což se dá do češtiny přeložit jako uzavřená smyčka. Je to konstrukčně relativně jednoduché řešení. U předchozích variant bych muselo být řešeno umístění pružin a jejich dimenzování. Tento problém tedy použitím zmíněné varianty odpadá.

Nyní je tedy možno přejít k samotnému konstrukčnímu řešení, které bude zajišťovat pohyb prstů. Je znázorněno na obrázku 5.1 a využívá toho, že je poháněn pouze článek prstu, který je umístěn nejbližší zápěstí. Pohyb ostatních dvou článků bude zajištěn dalšími dvěma lanky. Pro lepší orientaci a pro zjednodušení bude článek, který je nejbližší k zápěstí označen jako první článek, prostřední jako druhý a koncový článek bude třetí. Umístění lanek bude tedy takové, že první smyčka bude mezi servomotorem, který bude umístěn v zápěstí a bude navinut na první článek. Další smyčka bude mezi kladkou, která je umístěna na zápěstí a kladkou na druhém článku. A třetí smyčka bude mezi kladkami prvního a třetího článku, přičemž tyto dvě poslední smyčky se musí křížit, aby byl zajištěn

správný pohyb prstu, tedy svírání. Nutno ještě podotknout, že všechny kladky jsou na člancích umístěny pevně, což je rozdíl oproti otevřenému řetězci, kdy kladky musí být uloženy volně a musí se otáčet na čepech. Kdyby však zde byly umístěny volně otočné kladky na uzavřeném řetězci, tak by se kladky pouze volně otáčely a kromě otáčení kladek by zde nebyl žádný jiný pohyb.



Obr. 5.1 – Uspořádání lanek

Pro ověření správnosti výše uvedeného schématu byl vyroben dřevěný prototyp, který je znázorněn na obrázku 5.2. Tento mechanismus je vyroben z dřevěných překližek a klasických metrických šroubů. Byla tedy ověřena správnost kinematického řešení a lze tedy přistoupit k dalšímu rozpracování konstrukce prstu.



Obr. 5.2 – Dřevěný prototyp

5.1.2 Výpočet průměru kladek

Důležitým faktorem, určujícím kinematické vlastnosti robotické ruky jsou průměry kladek. Za předpokladu, že by průměry všech kladek byly stejné, tak by se všechny články ohýbaly o stejný úhel, tedy 90° . To ovšem není žádoucí, protože při uchopování velkých objektů by se koncové články ohýbaly příliš rychle a uchopení takovýchto objektů by nebylo možné. Snahou je, aby se první článek ohýbal rychleji než druhý, a druhý zase rychleji než třetí. Výpočet úhlů natočení se vypočte během jednoduchého vzorce.

- pro délku kružnice platí vztah:

$$S = \widehat{\varphi} \cdot R \quad [3]$$

- při odvalování lanka se obě lanka budou odvalovat o stejnou dráhu, musí tedy platit, že:

$$\widehat{\varphi}_1 \cdot R_1 = \widehat{\varphi}_2 \cdot R_2$$

- první článek se otočí o 90° a průměr kladky na zápěstí je 15 mm, průměr na druhém článku volím 20 mm, nyní lze dopočítat úhel natočení podle rovnosti délek odvalovaného lanka:

$$\widehat{\varphi}_2 = \widehat{\varphi}_1 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad \text{jelikož se násobí úhel poměrem průměrů, lze dosadit ve stupních}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 \cdot \frac{R_1}{R_2} = 90 \cdot \frac{15}{20} = 67,5^\circ$$

- relativní úhel pootočení prvního článku vůči druhému bude $67,5^\circ$
- stejným postupem lze vypočítat i relativní pootočení třetího článku vůči druhému
- průměry kladek jsou stejné jako v prvním případě

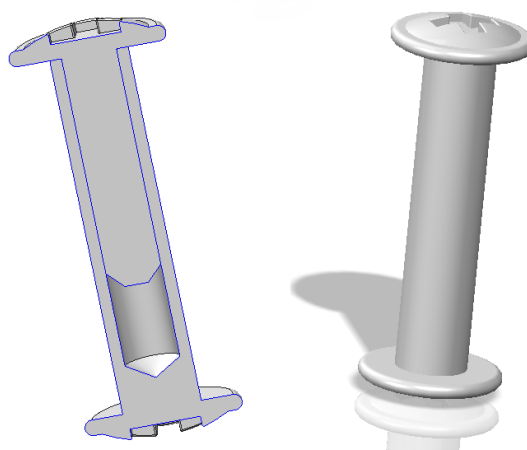
$$\varphi_3 = \varphi_2 \cdot \frac{R_2}{R_3} = 67,5 \cdot \frac{15}{20} = 50,625^\circ$$

Úhel relativního pootočení druhého článku vůči třetímu při sevření pěsti bude $50,625^\circ$.

Konstrukčně je zde snaha robotickou ruku co nejvíce přiblížit té lidské. Bylo tedy vycházeno z rozměrů ruky lidské, některé rozměry jsou však o něco větší, jelikož by je z hlediska konstrukce bylo velice složité dodržet. Každá článek je opatřen zarážkou tak, aby se prsty zastavili vždy v pozici rovnoběžné s dlaní. A naopak při svírání se první článek zastaví v pozici, kdy svírá se zápěstím pravý úhel.

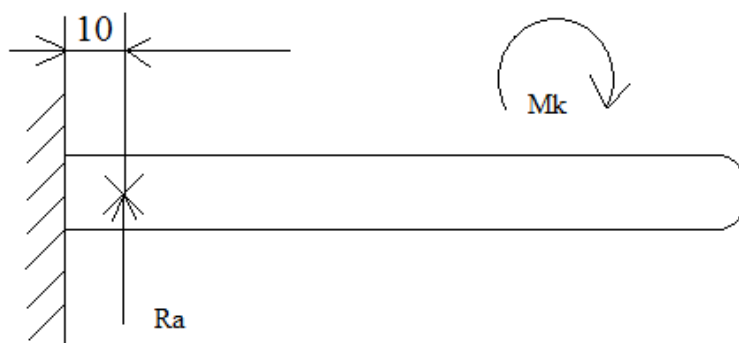
5.1.3 Spojení prstů pomocí čepů a jejich pevnostní kontrola

Jednotlivé články budou spojeny pomocí speciálních čepů. Čep se sestává ze šroubu s vnitřním závitem a šroubu s vnějším závitem. Tyto čepy jsou určeny pro použití spíše v oblasti nábytkářství, ale pro tuto aplikaci se také hodí a jejich použití je výhodnější než použití klasických čepů s jištěním pomocí závlačky. Tyto čepy jsou zobrazeny na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 - Spojovací čepy

Čepy budou nejvíce namáhány na stříh, a proto je nutné provést jejich pevnostní kontrolu. Kontrola bude vycházet ze schématu a výpočtu krouticího momentu, které je použito při dimenzování servomotorů (příloha č. 2). Prsty budou tedy nataženy a bude na nich položen předmět o hmotnosti 1 kg. Nejvíce namáhán bude čep, který spojuje první článek s dlaní. První bude proveden výpočet reakce v místě uložení čepu. Toto schéma je naznačeno na obr. 5.4. Výpočet vychází z předpokladu, že při natažení prstů dojde k opření stykových ploch prvního článku prstu a dlaně a vznikne zde pevná vazba a také z toho, že čep je celistvý a dále se zanedbává hmotnost prstu, která je v desítkách gramů.



Obr. 5.4 – Reakce místě uložení čepu

$$Mk = 245 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

[4]

$$Ra = \frac{Mk}{10} = \frac{245}{10} = 24,5 \text{ N}$$

- reakce v místě uložení čepu je tedy 24,5 N

- výpočet smykového napětí:

d – průměr čepu = 5 mm

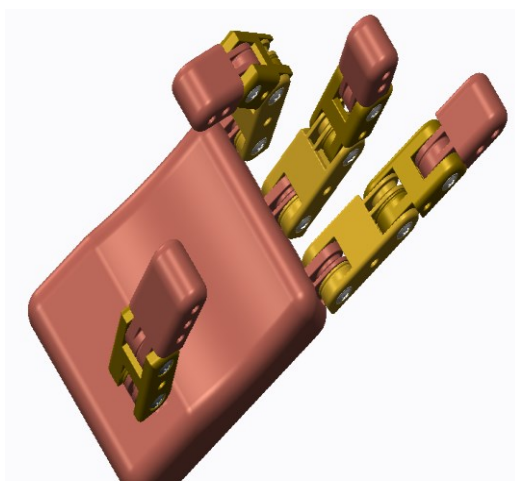
$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} = \frac{8 \cdot F}{3 \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{8 \cdot 24,5}{3 \cdot \pi \cdot 5^2} = 0,83 \text{ MPa} \quad [5]$$

- výsledné smykové napětí je tedy 0,83 MPa

Výrobce čepu neudává třídu oceli, ze které jsou čepy vyrobeny. Pevnost ve smyku základních ocelí se ale pohybuje v řádu desítek MPa, čep tedy vydrží namáhání.

5.1.4 Rozmístění prstů a pevnostní výpočty článků prstů

Dalším krokem bylo určení postavení prstů. Opět je vycházeno z lidské ruky, avšak lidská ruka má pět prstů a zde jsou k dispozici prsty pouze čtyři. Základní koncept však zůstává pořád stejný a to je postavení více prstů v řadě, oproti kterým stojí v opozici palec.



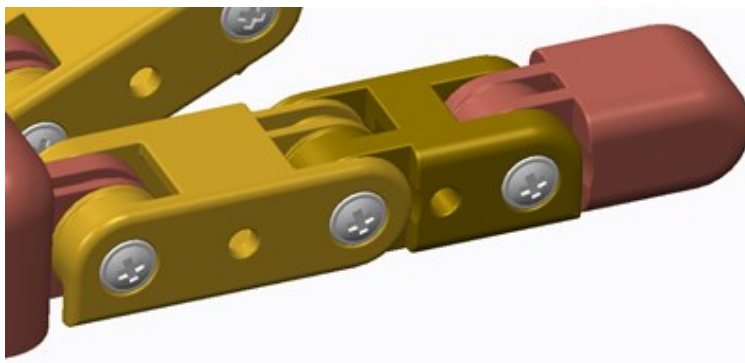
Obr. 5.4 – Postavení prstů

První 3 prsty sestávají ze tří identických článků.

Palec se však jinak konstrukčně tak počtem článků liší. Má o jeden článek méně, tedy jenom dva. To je však vykompenzováno jeho velikostí, je větší jak do délky, tak do šířky, aby měl lepší uchopovací vlastnosti. Palec není umístěn přesně uprostřed zápěstí, ale je umístěn asi v jedné třetině jeho šířky. Je to opět pro důvěryhodné napodobení anatomie lidské ruky. Postavení palce oproti ostatním prstům lze vidět na obrázku 5.4.

První dva články jsou duté a jsou opatřeny děrami. Duté jsou ze dvou důvodů. První je ten, že jimi musí procházet lanka a druhý je společný s dírami, které jsou z boku prstů. Prsty budou tištěny na 3D tiskárně a materiál do této tiskárny je zatím ještě relativně drahý a jelikož omezujícím faktorem, který musím respektovat při realizaci této ruky je cena, tak musím použít co nejméně materiálu. Stačí tedy zachovat nosný skelet prstů a kladky, které zde splňují funkční úlohu, díky které se prsty budou moci pohybovat. Díry ve

skeletonu tedy články prstu pouze odlehčují, ale na pevnost článků nemají zásadnější vliv. Prst si lze detailně prohlédnout na obrázku 5.5.



Obr. 5.5 – Detail prstu

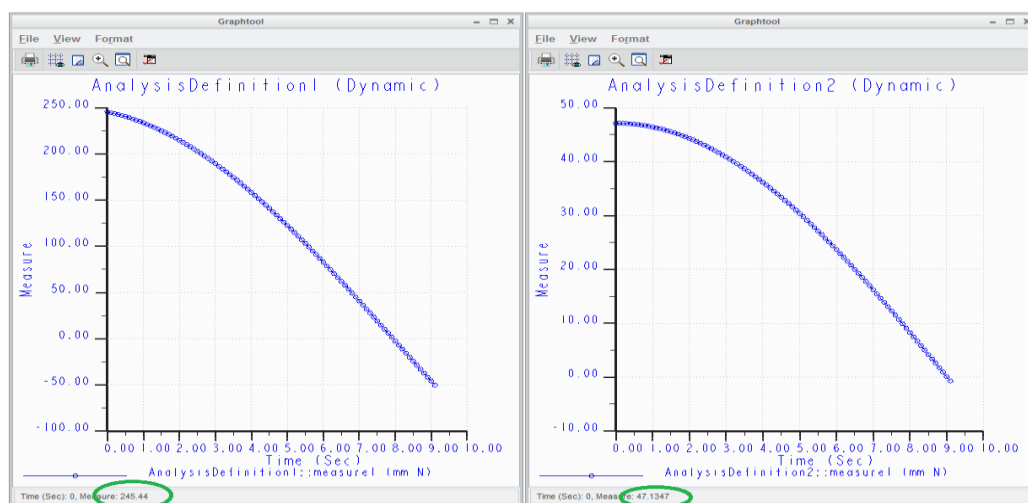
Dále bude proveden pevnostní výpočet jednotlivých článků prstů. Tento výpočet je uveden v příloze č. 4 – Pevnostní výpočet článků prstů.

5.2 Dimenzování a výběr vhodných servomotorů

Dalším krokem je dimenzování vhodných servomotorů. Dle požadavkového listu musí být zajištěno, aby ruka uzvedla objekt manipulace o hmotnosti 1 kg. Nejprve bylo nutno určit, kdy se ruka nachází v poloze, kdy bude OM nejvíce zatěžovat servomotory, a podle této nejvyšší hodnoty je poté mohu dimenzovat. Tato poloha nastane tehdy, když dlaň bude směřovat kolmo nahoru a všechny prsty budou nataženy. Dále je stanoveno zrychlení, které by měl prst vydržet. Dnes se můžeme setkat s roboty, kteří se dokáží pohybovat se zrychlením až $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, zde je však počítáno s menším zrychlením, které má hodnotu $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Detailní výpočet s podrobným popisem postupu je obsažen v příloze č.2 – Výpočet uchopovací síly. Pro ověření správnosti výsledků byl proveden ještě jeden výpočet pomocí softwaru Creo Parametric, v modulu mechanismy.

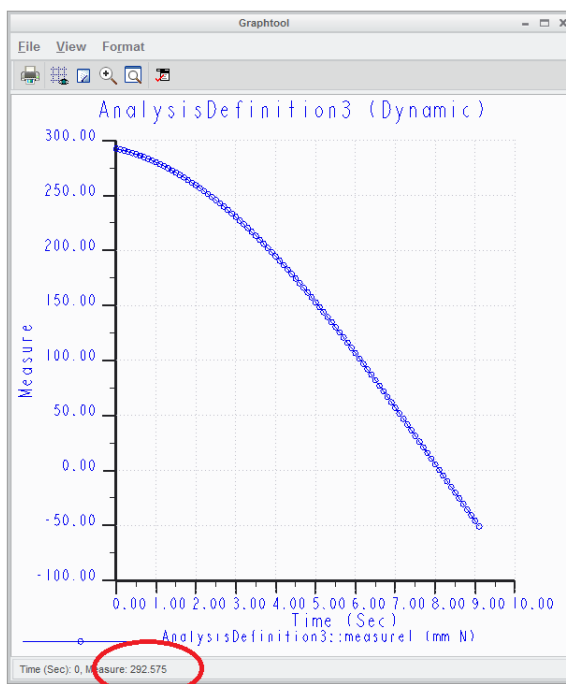
Při komparaci výsledných momentů vyšel moment pouze při zatížení silami, které způsobuje objekt manipulace, stejný jak v softwaru, tak pomocí ručního výčtu. Momenty způsobené vlastní tíhou prstů se mírně lišily, což bylo způsobeno tím, že v ručním výpočtu jsou hodnoty souřadnic těžiště a hmotnosti zaokrouhlovány. Software dále nabízí grafy, vyjadřující závislost potřebného momentu a času. V čase 0 sekund se prst nachází v pozici

natažených prstů a dále se postupně svírá. První graf (obr. 5.6) moment, který vyvolá zatížení od síly, kterou způsobuje OM a druhý (obr. 5.7) vyjadřuje velikost momentu, potřebného k překonání síly, kterou způsobuje vlastní hmotnost prstu. Poslední graf vyjadřuje celkový moment, který bude potřeba pro manipulaci s objektem (obr. 5.8)



Obr. 5.6 – Momentová charakteristika 1 Obr. 5.7 – Momentová charakteristika 2

V levém horním rohu je vždy hodnota momentu v čase 0 sekund. Podle ručního výpočtu vyšel potřebný moment 295 N·mm a v softwaru 293 N·mm. Nyní tedy lze přejít k výběru vhodného servomotoru. Musí se ovšem také počítat se třením, které bude vznikat v kloubech a také při přenosu síly pomocí lanek.



Obr. 5.8 – Celková momentová charakteristika



Obr. 5.9 – Servo HS - 85BB

Při výběru bylo nutné dbát na to, aby zvolený servomotor měl při co nejmenší rozměr, aby jej bylo možno umístit pohodlně do zápěstí. Byl vybrán servomotor s označením HS-85BB (obr. 5.9). Jde o silné mikro servo s plastovými převody a kuličkovým ložiskem. Servo bude objednáno z webové stránky <http://www.rcpark.cz>, které se zabývá prodejem komponent pro modelářství. Na této stránce se nachází uvedené servo za nejnižší cenu, která je 413 Kč vč. DPH. Technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Napájení [V]	4.8 - 6
Délka [mm]	29
Šířka [mm]	13
Výška [mm]	30
Hmotnost [g]	19.2
Tah při 4.8V [kg·cm]	3
Tah při 6.0V [kg·cm]	3.5
Rychlost při 4.8V [s/60st.]	0.16
Rychlost při 6.0V [s/60st.]	0.14
Kuličková ložiska	1xBB
Převody serva	plastové
Typ serva	analogové
Highvoltage	ne
Velikost serva	Micro

Tab. 5.1 – Parametry servomotoru 85 BB

Většina výrobců modelářských potřeb udává moment v jednotce kg·cm, zde je ale potřeba znát moment v jednotce N·mm. Je potřeba si moment tedy přepočítat podle následujících vztahů:

$$M[N \cdot mm]$$

$$M'[kg \cdot cm]$$

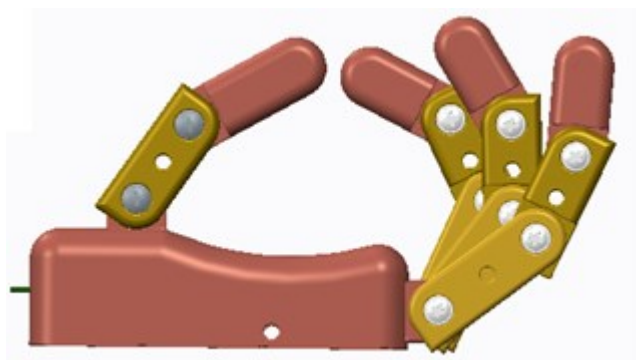
$$\frac{M'}{M} = \frac{kg \cdot cm}{N \cdot mm} = \frac{kg \cdot mm}{10 \cdot kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot mm} = \frac{1}{10 \cdot g} \quad [6]$$

$$M = M' \cdot 10 \cdot g$$

$$M = 3,5 \cdot 10 \cdot 9,81 = 343 N \cdot mm$$

- Zvolený servomotor má dostatečný krouticí moment

Další krok je zvolit servomotor pro palec. Je nutno brát v úvahu to, že palec stojí sám a proti němu budou působit 3 prsty. Musí mít tedy výkonnější servomotor. Na druhou stranu má palec menší délku a tudíž síla působící na kratším ramenu způsobí menší moment. Další výhodou pro palec je ergonomický tvar zápěstí (obr. 5.9), který zajistí, že část síly se přenesle právě do zápěstí. A poslední výhodou je to, že plochy prstů a zápěstí budou polepeny protiskluzovým materiálem, tudíž objekt manipulace nebude po zápěstí klouzat a nebude se opírat do palce. A v poslední řadě je palec konstrukčně navržen tak, aby se dostal maximálně do pravého úhlu vůči zápěstí, tudíž nemůže dojít k jeho překlolení a k upuštění objektu manipulace.



Obr. 5.9 – Ergonomický tvar zápěstí

Pro ohyb palce bylo zvoleno servo HS-225 BB. Toto servo je stejného typu jako výše uvedené a je objenáno ho ze stejné webové stránky, akorát má o něco větší rozměry a dokáže vyvinout větší moment. Parametry tohoto serva jsou opět uvedeny v tabulce 5.1. a jeho cena je 367 Kč vč. DPH.

Napájení [V]	4.8 - 6
Délka [mm]	32.4
Šířka [mm]	16.8
Výška [mm]	31
Hmotnost [g]	27
Tah při 4.8V [kg/cm]	3.9
Tah při 6.0V [kg/cm]	4.8
Rychlost při 4.8V [s/60st.]	0.14
Rychlost při 6.0V [s/60st.]	0.11
Kuličková ložiska	1xBB
Převody serva	plastové
Typ serva	analogové
Highvoltage	ne
Velikost serva	Mini

Tab. 5.2 – Parametry servomotoru HS-225 BB

Opět je proveden přepočet krouticího momentu podle vzorce 6.

$$M = M' \cdot 10 \cdot g$$

$$M = 4,8 \cdot 10 \cdot 9,81 = 471 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

- Moment serva na palci je téměř o 40 % větší, než na zbývajících prstech, což je dostačující

5.3 Řízení pohybu prstů

Po návrhu všech servomotorů lze přejít k výběru vhodné řídicí jednotky. Výběr byl proveden z internetového obchodu <http://shop.snailinstruments.com>. Tento obchod se specializuje na prodej komponent pro roboty. Jsou zde k dostání motory, serva, řídicí jednotky, senzory a mnoho dalšího. Nabízí také kontroléry pro servomechanismy. Nabízí kontroléry pro 6,12,18 nebo 24 servomotorů. Pro mou aplikaci bude stačit kontrolér Micro Maestro6 (obr. 5.10), který je určen až pro 6 servomotorů a jeho cena je 717 Kč.

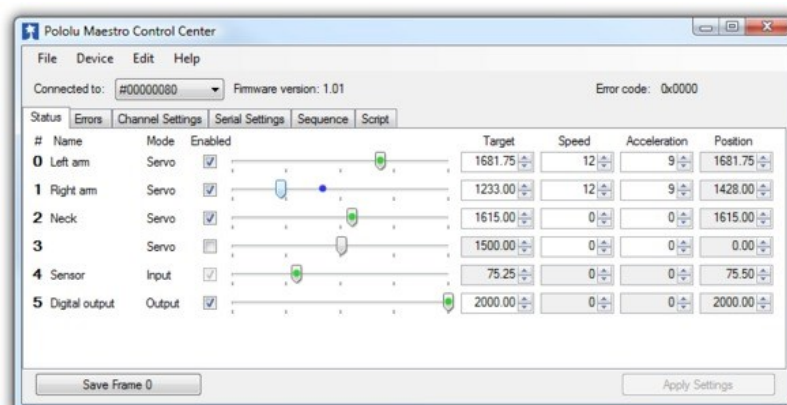


Obr. 5.10 – MicroMaestro 6

Kontrolér má následující parametry:

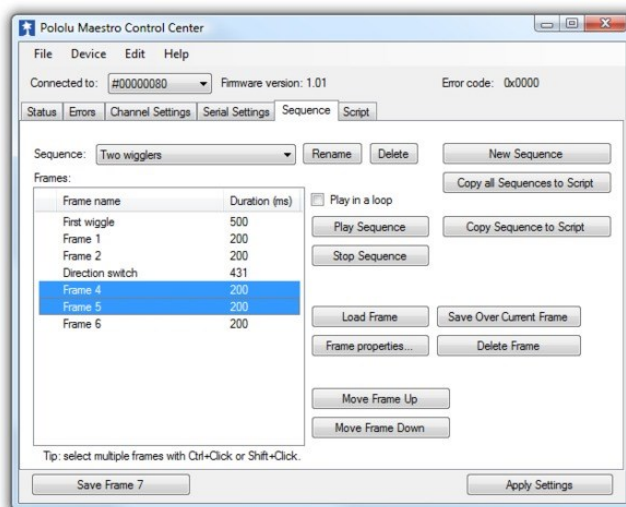
- Šířka pulsu 0,064 až 3,28 ms
- Rozlišení 0,25 μ s
- Nezávislé řízení rychlosti serv
- Napájení z USB portu nebo 5-16V
- Rozměry 21 x 31mm

Na stránkách výrobce kontroléru (<http://www.pololu.com/catalog/product/1350>) je podrobný návod na používání kontroléru. Je zde i ke stažení software pro řízení s názvem Pololu Maestro Control Center. Tento software nabízí uživatelsky příjemné prostředí a zvládne ho ovládat každý i bez znalosti programování. Hned v první záložce (obr. 5.11) se dá pohybovat servy. Každé servo se dá pojmenovat pro jednoduchou identifikaci. Zelené kolečko udává aktuální polohu serva a tažením táhla určíme požadovanou polohu. Dále lze nastavit polohu přímo jako číselnou hodnotu. Co se dá lze nastavit je rychlost serva a jeho zrychlení.



Obr. 5.11 – Řízení polohy servomotorů

Software také nabízí možnost si nahrávat tzv. sekvence (obr. 5.12). V každé sekenci má každé servo určenou polohu. Jednotlivé sekvence si lze poté přehrávat a tím určovat polohy jednotlivých serv.



Obr. 5.12 - Sekvence

Tyto záložky postačují pro základní ovládání mikrokontroléru. Pro náročnější uživatele je k dispozici možnost řízení dalších parametrů anebo je zde i možnost, aby si uživatel sám mikrokontrolér naprogramoval.

Nyní už stačí jenom zajistit dostatečný zdroj energie. Serva budu napájet síťovým adapterem, který se připojí na mikrokontrolér. Potřebuji napětí 6 V, aby servo vyvinulo moment, který byl vypočten v předchozí kapitole. Dále výrobce udává potřebný proud pro jedno servo 260 mA pro pohyb naprázdno. Hodnota při zatížení bude několikanásobně vyšší, než je hodnota proudu naprázdno. Těmto požadavkům odpovídá síťový adaptér MINWA, který poskytuje napětí 6 V a proud 2250 mA (obr. 5.13). Tento adaptér byl zakoupen v obchodě GM Electronic za částku 201 Kč.



Obr. 5.13 – Síťový adaptér MINWA

Koncovku adaptéru bylo potřeba nahradit dvou-pinovým konektorem, aby jej bylo možno připojit k mikrokontroléru (obr. 5.14). Cena tohoto konektoru je 2 Kč a konektor byl pořízen taktéž v obchodě GM Electronic.

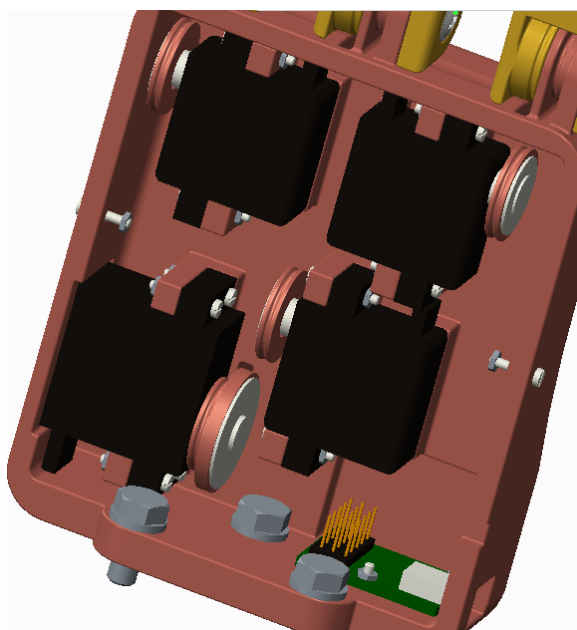


Obr. 5.14 – 2-pin konektor

5.4 Konstrukční řešení zápěstí

Nyní už jsou známy rozměry všech servomotorů a řídicí jednotky a lze přejít ke konstrukce zápěstí. Konstrukční řešení už je částečně naznačeno ve dvou výše uvedených kapitolách. Jedná se o umístění palce proti zbývajícím prstům a o ergonomický tvar vnitřní strany zápěstí. V této kapitole bude rozvedeno jednak prostorové umístění komponent uvnitř zápěstí a také zakrytování zápěstí.

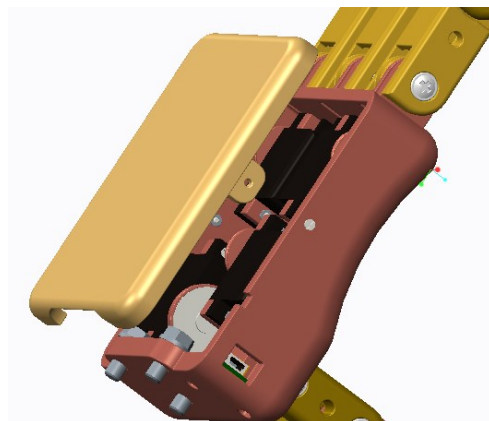
Na začátku návrhu bylo uvažování s tím, že součástí robotické ruky bude také předloktí, kde budou umístěny všechny elektronické komponenty. Po zvolení servomechanismů a kontroléru bylo ale usouzeno, že by bylo vhodné je umístit už přímo do zápěstí. Pohodlně se tam vlezou a nebude potřeba vést lanka, která budou pohánět prsty až do zápěstí. Toto řešení také přinese velikou úsporu materiálu a celkově bude robotická ruka kompaktnější. Při návrhu jednotlivých variant bylo vycházeno z předpokladu, že se bude konstruovat i předloktí a zápěstí se bude sestávat pouze z jednoho celku. Při nynějším návrhu se však zápěstí bude muset skládat ze dvou částí. Jedna část bude nosná, bude nést všechny čtyři prsty a také na ni budou přimontovány servomotory a kontrolér. Druhou část bude tvořit kryt, který bude mechanicky přichycen k nosné části a bude tvořit vnější část zápěstí.



Obr. 5.15 – Vnitřek zápěstí

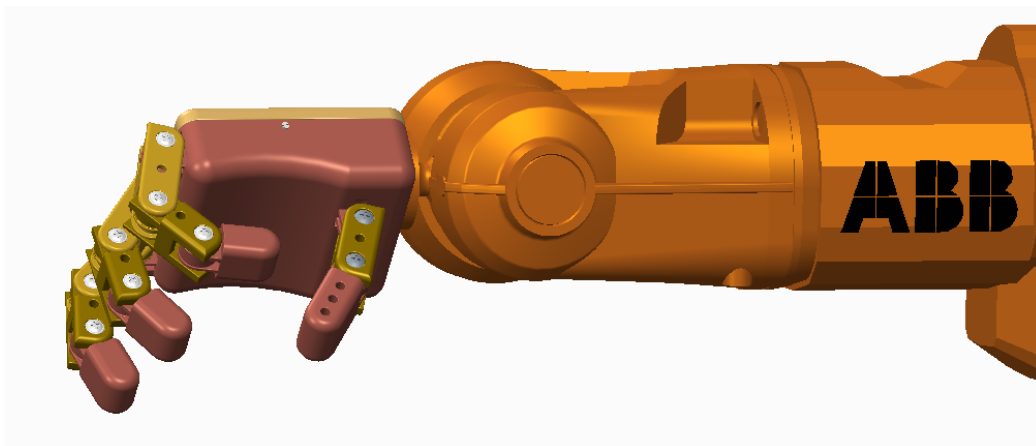
Na obrázku 5.15 lze vidět umístění servomotorů a kontroléru v zápěstí. V zápěstí jsou vymodelovány profily, na které lze uchytit serva pomocí šroubů. Menší serva jsou uchyceny dvěma šrouby M2 z každé strany a velké servo je uchyceno čtyřmi šrouby stejné velikosti. Kontrolér je uchycen k zápěstí taktéž pomocí šroubů M2. Dále je z boku zápěstí udělaná díra, kterou se prostrčí konektor USB mini.

Dále je možno vidět na obrázku 5.16 řešení krytu. Kryt se jednoduše nasadí na zápěstí a pomocí šroubů M2 se přichytí k předloktí. Mezi zápěstím a krytem nad dírou pro připojení USB je vybrání, pro protažení vodiče, který bude serva napájet.



Obr. 5.16 – Zakrytování zápěstí

Dále je nutné řešit přichycení celé robotické ruky k robotu. Ruka bude přichycena na průmyslový robot, který je na Katedře robototechniky. Jedná se o robot od firmy ABB model IRB 140. Na konci zápěstí jsou 3 díry, kterými bude pomocí tří šroubů M6 přichycena ruka k interfejsu robota.



Obr 5.17 – Spojení robotické ruky a robota

V poslední řadě je řešen způsob přenosu síly ze serv na prsty. Pro tento byly vymodelovány speciální kladky, které budou následně přilepeny ke stávajícím servům. Kladky mají průměr 20 mm, tak jako kladky na člancích prstů, které jsou umístěny nejbližší zápěstí. Bude tak zajištěn pohyb těchto článků o celých 90°.

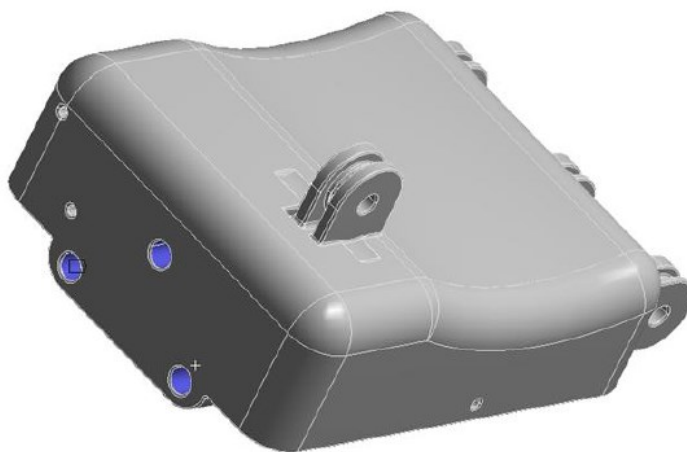
Co se týče dalšího montážního postupu, všechna lanka budou přilepena ke kladkám pomocí speciálního lepidla, určeného k lepení plastů firmy Loctite. Je použito běžné silonové lanko průměru 0,5 mm.

5.5 Pevnostní kontrola zápěstí

Před samotnou výrobou všech komponent na 3D tiskárně byla vabraná část robotické ruky podrobena pevnostní kontrole. Tou součástí bylo zápěstí, jelikož bude nejvíce namáháno na ohyb a mohlo by se stát, že by v některém místě prasklo. Stěny zápěstí z důvodu úspory materiálu nejsou příliš silné a proto je potřeba tuto kontrolu provést, aby po sestavení robotické ruky a při následném provozu nedošlo k poškození součásti. Pro výpočet byla použita školní verze softwaru Ansys, který je určen pro pevnostní výpočty a je založen na metodě konečných prvků.

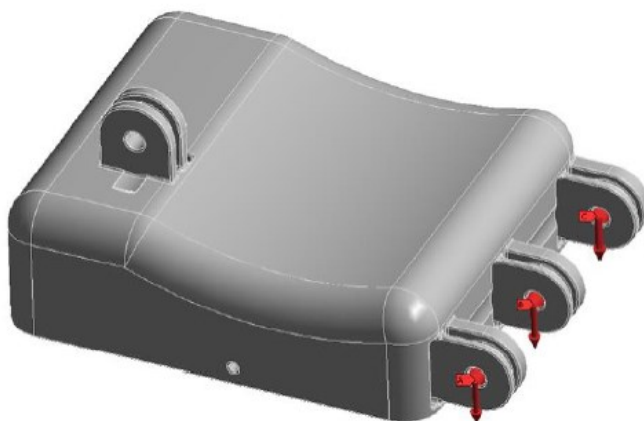
Postup pevnostního výpočtu byl následující:

- Nahrání modelu do softwaru Ansys
- Definování materiálu: polykarbonát
- Vytvoření mřížky, kterou využívá výpočet MKP
- Zavazbení modelu (obr. 5.18)
- Definování sil (obr. 5.19)
- Výpočet: redukované napětí (obr. 5.20)



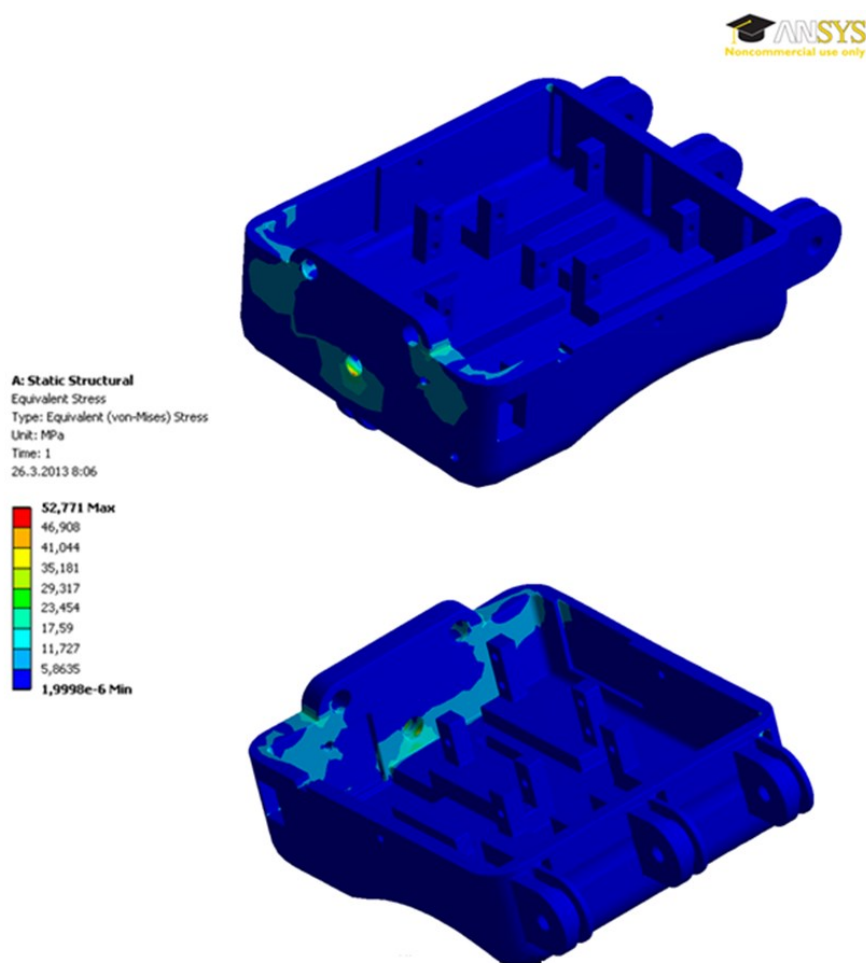
Obr. 5.18 – Zavazbení modelu

Model je zavazben v místě, kde jsou díry pro šrouby, pomocí kterých bude RR přichycena k robotu.



Obr. 5.19 – Definování sil

Velikost působící síly je určena podle výpočtu 4 v kapitole 5.1.3.



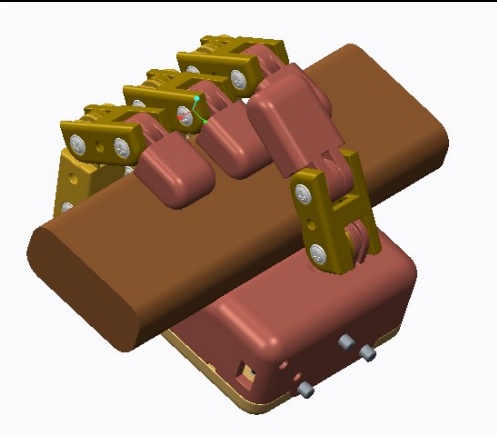
Obr. 5.20 – Výpočet redukovaného napětí

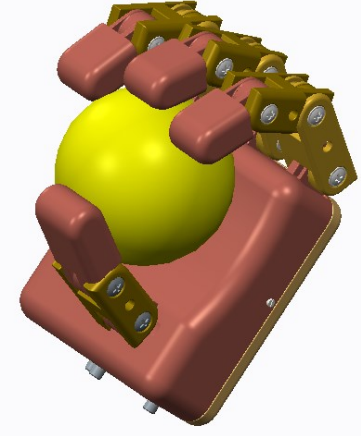
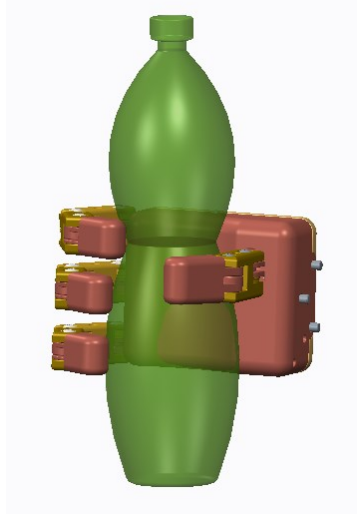
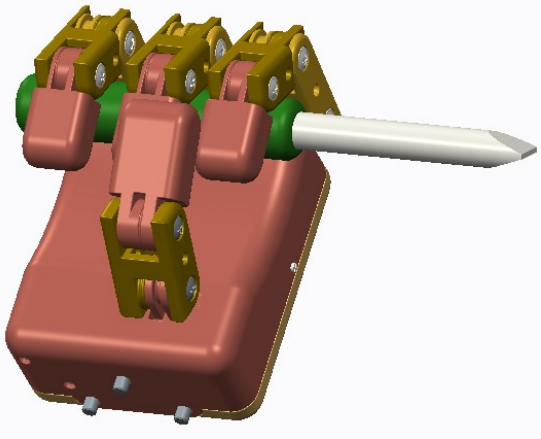
Na obrázku 5.20 již lze vidět výsledky výpočtu pevnostní kontroly. Byla zde obava, zdali nedojde k lomu v místě bočních stěn zápěstí, které jsou nejbližší robotu. V těchto místech se napětí pohybuje okolo 15 MPa. Polykarbonát, ze kterého bude zápěstí vyrobeno má pevnost v tahu 68 MPa. V těchto místech by tedy nemělo dojít k lomu. Největší napětí je v místě děr, kde je zápěstí uchyceno k robotu pomocí šroubů. To se dalo předpokládat z toho důvodu, že je v těchto místech provedeno zavazbení při simulaci zatížení. Napětí zde však bude menší, jelikož se bude zápěstí opírat o interfejs robotu a napětí se tedy rozloží. I tak však zápěstí prošlo pevnostní kontrolou a může se tedy vyrobit.

6 Analýza možných úchopů

Důležitou součástí této bakalářské práce je také analýza možných úchopů, které lze robotickou rukou provést. Od začátku byla snaha konstruovat ruku tak, aby byla možná použit pro co největší spektrum předmětů používaných v každodenním životě. OM nesmí přesáhnout hmotnost jednoho kilogramu

Na robotickou ruku budou po montáži nalepeny speciální samolepicí pěnové pásky z umělé hmoty o tloušťce zhruba 2 mm, které dopomohou k lepšímu úchopu daného předmětu. Pásky budou nalepeny na celé ploše vnitřní strany zápěstí a dále na vnitřní straně všech prstů.

	<p>Obdelníkový profil</p> <p>Max. rozměry:</p> <p>Hliník - (30 x 70 x 200) mm</p> <p>Ocel – (30 x 70 x 60) mm</p>
-------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p>Míček</p> <p>Max. průměr: 80 mm</p>
	<p>Pet láhev (1,5 l)</p> <p>Náplň: max 1 litr</p>
	<p>Šroubovák</p> <p>Průměr madla: (20 – 40) mm</p>



Tab. 6.1 – Analýza možných úchopů

7 Cenová kalkulace

V této kapitole bude provedena cenová kalkulace. Největší částku na výrobu robotické ruky tvoří náklady na výrobu jednotlivých částí pomocí technologie Rapid Prototyping. Pohony, elektronika a spojovací materiál tvoří asi jen zhruba čtvrtinu z celkové ceny. Prostor pro zlevnění výroby je tedy ve volbě jiné technologie výroby jednotlivých částí robotické ruky. V tabulce 7.1 jsou přehledně uvedeny částky za jednotlivé komponenty.

Cenová hranice stanovená v požadavkovém listě byla 20 000 Kč. Montáž zabrala zhruba 10 hodin. Po přičtení částky za montáž se tedy náklady nedostanou přes stanovenou částku.

Komponent	Cena (Kč)/ks	Počet kusů	Suma (Kč)
Prst	2088	3	6264
Palec	1598	1	1598
Velká kladka	112	1	112
Malá kladka	54	3	162
Zápěstí	7264	1	7264
Spojovací materiál	200	1	200
Servo na prsty	413	3	1239
Servo na palec	367	1	367
Síťový adaptér	200	1	200
Řídící jednotka	717	1	717
Montáž	-	-	-
Celková cena			18123 Kč

Tab. 7.1 – Cenová kalkulace

8 Závěrečné zhodnocení

Výsledkem této bakalářské práce je vytvoření plně funkčního prototypu čtyřprsté robotické ruky. Po vypracování několika variant řešení byla vybrána optimální, která byla dále rozpracována. Byly splněny všechny požadavky, které byly definovány v požadavkovém listu. Největším omezením při řešení bylo použití pouze 4 pohonů. Bylo potřeba najít způsob rozmístění kladek a lanek tak, aby polohy jednotlivých článků prstů byly navzájem svázány. Výsledné rozměry robotické ruky jsou zhruba (220 x 100 x 50) mm. Má tedy o něco větší rozměry, než skutečná lidská ruka, Je to dáno především velikostí pohonů, které zde byly použity.

Výhodami této robotické ruky je především jednoduchost řešení. Při nosnosti 1 kg dokáže uzvednout běžné předměty denního použití. Nabízí také jednoduché ovládání, které zvládne každý průměrný uživatel PC. Nehodí se však pro těžší a objemnější předměty. Nevýhodou je také relativně nízká přesnost polohování, nelze ji tedy použít pro manipulaci s velmi malými předměty. Celá ruka je napájena ze sítě, což zajišťuje stálý přísun energie, nevýhodou je však omezení mobility tohoto zařízení.

Nakonec jsou uvedeny některé návrhy na zlepšení robotické ruky. Jedná se především o uchycení lanek ke kladkám pomocí lepidla, což vytvoří nerozebíratelný spoj. Bylo by zde například možné nahradit lanka táhly, spojenými s kladkami pomocí čepů. Dále by bylo vhodné opatřit články prstů taktilními sensory, které by informovali o přítomnosti objektu manipulace. Bylo by tedy poté možné uchopovat křehké předměty bez obavy o jejich rozbití. Důležité je také chlazení, jelikož se motory zahřívají, a toto přebytečné teplo je nutné někam odvádět. Bylo by vhodné provést potřebné výpočty a poté navrhnout větrací otvory. Při občasném použití na chlazení stačí díry pro vedení lanek a pro kabeláž, ale při dlouhodobém používání by se motory mohly začít přehřívat. A v poslední řadě je potřeba vylepšit design ruky, aby ještě více připomínal ruku lidskou.

9 Seznam použité literatury

- [1] KÁRNÍK, Ladislav a Jozef NOVÁK-MARCINČIN. *Biorobotická zařízení*. Vyd. 1. S.l.: Máfy Slezsko, 1999, 183 s. ISBN 80-902-7460-9.
- [2] TSAI, Lung-Wen. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. New York: Wiley, c1999, xiii, 505 s. ISBN 04-713-2593-7
- [3] Antropomorfní chapadla pro nestrojírenské aplikace. In: *Automa* [online]. 2003 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28997
- [4] Veletrh AUTOMATICA 2006. Robotika a automatizace společně. *Glassrevue* [online]. 2006, č. 14 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=5001&cid=6.html>
- [5] Sandia Hand – low cost robotic arm for bomb dismantling. In: *RobAid* [online]. 2012 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.robaid.com/robotics/sandia-hand-low-cost-robotic-arm-for-bomb-dismantling.htm>
- [6] MACHAND. In: *MACHAND* [online]. 2006 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.dist.unige.it/cannata/MACHAND.htm>
- [7] Shadow robot company. *Shadow Dexterous Motor Hand* [online]. 2012 [cit. 2012-10-15]. Dostupné z: <http://www.shadowrobot.com/hand/motorhand.shtml>
- [8] BeBionic. *BeBionic* [online]. 2012 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://bebionic.com/>
- [9] Japonská firma vyvinula lehkou a levnou robotickou ruku Handroid. In: SCHÖN, Otakar. *Tech.ihned.cz - Roboti* [online]. 2011 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://tech.ihned.cz/roboti/c1-52672670-japonska-firma-vyvinula-lehkou-a-levnou-robotickou-ruku-handroid>
- [10] *Elumotion* [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.elumotion.com/Elu2-hand.htm>

- [11] MISHRA, Chandan Kumar a Surendra SAHU. CONSTRUCTION, ANALYSIS AND CONTROL OF A FOURFINGERED ROBOTIC HAND. In: Scribd [online]. 2011 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/55455224/FourFingered-Robotic-Arm>

10 Seznam příloh

Výkresová dokumentace

- [1] Sestavný výkres robotické ruky (Creo Parametric 2.0)

Přílohy v elektronické podobě

- [2] Výpočet uchopovací síly (Mathcad 15)
- [3] 3D model robotické ruky (Creo Parametric 2.0)
- [4] Pevnostní výpočet článků prstů (Mathcad 15)